

Thermodynamik 1

Klausur

12. März 2014

Bearbeitungszeit: 150 Minuten

Umfang der Aufgabenstellung: 6 nummerierte Seiten

Alle Unterlagen zu Vorlesung und Übung sowie Lehrbücher und Taschenrechner sind als Hilfsmittel zugelassen.

Geben Sie diese Aufgabenstellung bitte zusammen mit Ihren Lösungsblättern ab. Füllen Sie die Angaben zu Ihrer Person aus und versehen Sie jedes Lösungsblatt mit Ihrem Namen.

Name: _____

Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

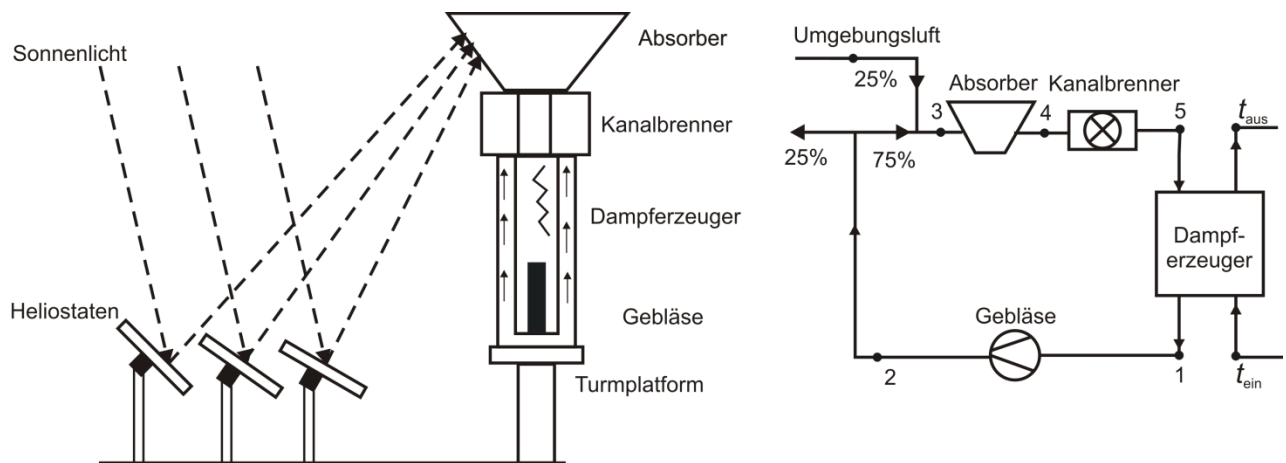
Unterschrift: _____

Angaben zur Korrektur

Aufgabe	Maximale Punktzahl	Erreichte Punkte	Korrektor
1	24		
2	28		
3	28		
Zwischensumme			
Bonuspunkte			
Summe			
Bewertung			

Aufgabe 1 (24 Punkte)

Solarturmkraftwerke sind technische Anlagen, die in industriellem Maßstab aus Solarenergie primäre Wärmeenergie erzeugen, die anschließend in elektrische Energie umgewandelt wird. Ein Solarturmkraftwerk nimmt die Direkteinstrahlung der Sonne über Heliostaten auf, die diese Strahlung dann auf einen Absorber fokussieren (s. Skizze).



Im Absorberkreislauf (Zustände 1-5) durchläuft ein Luftmassenstrom \dot{m}_L folgende Zustandsänderungen:

- 1→2 reversibel adiabate Verdichtung vom Zustand 1 ($t_1 = 200^\circ\text{C}$, $p_1 = 0.95\text{ bar}$) auf Umgebungsdruck ($p_2 = p_U = 1\text{ bar}$) im Gebläse, dabei wird dem Gebläse eine Leistung von 1 MW zugeführt
- 2→3 Austritt der Heißluft direkt vor dem Absorbereinlass. Der vom Absorber wieder angesaugte Massenstrom \dot{m}_L besteht zu 75 % aus Heißluft vom Zustand 2 und zu 25 % aus Umgebungsluft bei $t_U = 25^\circ\text{C}$, $p_U = 1\text{ bar}$
- 3→4: Wärmezufuhr im Absorber bis zur Temperatur $t_4 = 630^\circ\text{C}$ mit einem Druckverlust von 0.05 bar (dabei wird keine technische Arbeit gewonnen!)
- 4→5: zusätzliche isobare Wärmezufuhr von $\dot{Q}_{KB} = 10\text{ MW}$ im Kanalbrenner
- 5→1: isobare Wärmeabfuhr im nach außen hin adiabaten Dampferzeuger

Für die Berechnungen soll Luft als ideales Gas angenommen werden.

Die universelle Gaskonstante ist $R_m = 8.314472\text{ J}/(\text{mol K})$

Stoffeigenschaften von Luft sind $c_{p,L} = 1.066\text{ kJ}/(\text{kg K})$, $M_L = 28.96\text{ g/mol}$

- a) Skizzieren Sie den Prozess (Zustände 1 bis 5) in einem T,s -Diagramm. (5 P)
- b) Berechnen Sie den Luftmassenstrom \dot{m}_L . (5 P)
- c) Berechnen Sie die Temperatur T_3 vor dem Absorber. (3 P)

- d) Welcher Wärmestrom wird dem Absorber zugeführt? (2 P)
- e) Wie groß ist der im Dampferzeuger übertragene Wärmestrom? (2 P)
- f) Berechnen Sie die Anzahl der Heliostaten, wenn am Absorber pro m^2 Spiegelfläche ein Wärmestrom von 800 W ankommt? Jeder Heliostat hat eine Spiegelfläche von 120 m^2 . (3 P)
- g) Berechnen Sie die von der Luft bereitgestellte Exergie im Dampferzeuger. (4 P)

Aufgabe 2 (28 Punkte)

Ein Fernwärmekraftwerk in Kassel dient neben der Versorgung eines Fernwärmenetzes auch zur Elektrizitätserzeugung und zur Lieferung von Prozessdampf an in der Nähe liegende Industrieanlagen. Als Arbeitsmedium wird Wasser genutzt. Dieses durchläuft dabei die folgenden Zustandsänderungen:

1 → 2: vom flüssigen Zustand bei $t_1 = 70^\circ\text{C}$ und $p_1 = 1.5 \text{ bar}$ wird das Wasser reversibel adiabatisch auf den Kesseldruck $p_2 = 250 \text{ bar}$ komprimiert (Massenstrom $\dot{m}_A = 125 \text{ kg/s}$)

2 → 3: isobare Wärmezufuhr im Kessel bis $t_3 = 540^\circ\text{C}$

3 → 4: irreversibel adiabate Expansion in einer Hochdruckturbine ($\eta_{s,T} = 0.8$) auf den Zwischendruck $p_4 = 50 \text{ bar}$

Im Zustand 4 wird ein Teilstrom des überhitzten Wasserdampfs als Prozessdampf (Massenstrom \dot{m}_P) für benachbarte Industriebetriebe entnommen. Dieser wird in den Industriebetrieben auf den Zustand 1 (t_1 und p_1 wie oben) überführt und im Punkt 1 dem Kreisprozess wieder zugeführt.

4 → 5: Irreversibel adiabate Expansion des verbleibenden Massenstroms \dot{m}_B in einer Niederdruckturbine bis zum Zustand des gesättigten Dampfs bei $p_5 = 1.5 \text{ bar}$

5 → 1: Isobare Kondensation und Unterkühlung des Massenstroms \dot{m}_B durch Wärmeabgabe an den Fernwärmekreislauf in einem nach außen adiabaten Gegenstromwärmeübertrager bis auf t_1 .

Das im Fernwärmenetz umlaufende Wasser ($\dot{m}_F = 645 \text{ kg/s}$) tritt mit $t_{F1} = 65^\circ\text{C}$ in den Gegenstromwärmeübertrager ein und wird dort isobar auf $t_{F2} = 104^\circ\text{C}$ erwärmt.

Die isobare Wärmekapazität des Wassers in der Fernwärmeleitung hat einen mittleren Wert von $c_{p,w} = 4.20 \text{ kJ/(kg K)}$.

- Zeichnen Sie das Anlagenschema und tragen Sie alle gegebenen Daten ein. Stellen Sie den Prozess qualitativ richtig in einem T,s -Diagramm dar. (8 P)
- Wie groß ist der dem Kessel zugeführte Wärmestrom \dot{Q}_{23} ? (3 P)
- Wie groß sind die Teilmassenströme \dot{m}_P und \dot{m}_B , wenn die Summe der von den beiden Turbinen abgegebenen Leistung betragsmäßig den Wert von 54.24 MW hat? (7 P)
- Wie groß ist der im Kondensator bei der Wärmeübertragung auftretende Exergieverluststrom \dot{E}_V , wenn die Umgebungstemperatur $t_a = 20^\circ\text{C}$ beträgt? (6 P)
- Warum ist es als Heizungsnutzer in der Regel vorteilhaft Fernwärme im Vergleich zu einer Elektroheizung zu nutzen. Nennen Sie drei Gründe und gehen Sie dabei u.a. auf die Exergie ein. (4 P)

Kritische Daten von Wasser: $t_c = 373.95 \text{ °C}$, $p_c = 22.064 \text{ MPa}$, $\rho_c = 322 \text{ kg/m}^3$

Zweiphasiger Zustand Wasser

T °C	p MPa	ρ' kg / m ³	ρ'' kg / m ³	h' kJ / kg	h'' kJ / kg	s' kJ / (kg K)	s'' kJ / (kg K)
105.00	0.12090	954.70	0.70503	440.27	2683.4	1.3633	7.2952
110.00	0.14338	950.95	0.82693	461.42	2691.1	1.4188	7.2381
111.35	0.15000	949.91	0.86262	467.13	2693.1	1.4337	7.2230
115.00	0.16918	947.08	0.96540	482.59	2698.6	1.4737	7.1828

Homogener Zustand Wasser

T °C	p MPa	ρ kg / m ³	h kJ / kg	s kJ / (kg K)
65	0.15	980.57	272.22	0.8936
70	0.15	977.79	293.16	0.9551
75	0.15	974.86	314.12	1.0157
80	0.15	971.81	335.09	1.0755
85	0.15	968.63	356.09	1.1345
90	0.15	965.33	377.10	1.1928
95	0.15	961.91	398.14	1.2503
100	0.15	958.37	419.20	1.3072
105	0.15	954.72	440.30	1.3633
110	0.15	950.95	461.42	1.4188
115	0.15	0.85365	2700.8	7.2430
280	5.00	23.655	2858.1	6.0909
285	5.00	23.214	2875.9	6.1230
290	5.00	22.802	2893.0	6.1536
295	5.00	22.416	2909.6	6.1829
300	5.00	22.053	2925.7	6.2110
305	5.00	21.709	2941.4	6.2382
310	5.00	21.383	2956.6	6.2646
315	5.00	21.073	2971.6	6.2901
65	25.00	991.17	292.77	0.8798
70	25.00	988.44	313.46	0.9405
75	25.00	985.59	334.16	1.0004
80	25.00	982.61	354.88	1.0595
520	25.00	84.670	3238.4	6.0569
530	25.00	82.454	3272.9	6.1001
540	25.00	80.411	3306.5	6.1416
550	25.00	78.517	3339.2	6.1816

Aufgabe 3 (28 Punkte)

Ein Kolben-Zylinder-System (Querschnittsfläche $A = 5 \text{ dm}^2$) ist vollständig mit siedendem Aceton gefüllt (Zustand 1: $t_1 = 180^\circ\text{C}$, $V_1 = 5 \text{ dm}^3$). Nacheinander werden nun folgende Zustandsänderungen durchlaufen:

- 1→2 isochore Wärmeabfuhr bis zur Temperatur $t_2 = 150^\circ\text{C}$
- 2→3 reversibel isobare Expansion bis auf den Dampfgehalt $x_3 = 0.7$
- 3→4 isochore Wärmezufuhr bis nur noch gesättigter Dampf vorliegt

- a) Zeichnen Sie die Zustandsänderungen qualitativ richtig in ein p, v -Diagramm ein und skizzieren Sie dabei auch den Verlauf der Isothermen. (4 P)
- b) Wie groß sind die Drücke p_1 und p_2 , und welche Masse Aceton befindet sich im System? (2 P)
- c) Berechnen Sie den Dampfgehalt x_2 und den mit Dampf gefüllten Volumenanteil im Zustand 2 (Angabe in %). (4 P)
- d) Berechnen Sie die Volumenänderungsarbeit W_{23} und die zuzuführende Wärme Q_{23} . (6 P)
- e) Warum ist die Temperatur bei der Zustandsänderung von 2 nach 3 trotz Wärmezufuhr konstant? (2 P)
- f) Welche Temperatur liegt im Zustand 4 vor? (3 P)
- g) Wieviel Wärme muss von 3 nach 4 zugeführt werden? Wie lange dauert die Erwärmung, wenn ein Wärmestrom von $\dot{Q} = 100 \text{ W}$ zur Verfügung steht? (7 P)

Kritische Daten von Aceton: $T_c = 508.1 \text{ K}$, $p_c = 4.7 \text{ MPa}$, $\rho_c = 272.97 \text{ kg/m}^3$

Stoffdaten von Aceton im Sättigungszustand

T	p	ρ'	ρ''	h'	h''	s'	s''
K	MPa	kg/m^3	kg/m^3	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
413.15	0.93413	635.64	19.784	200.92	590.73	0.53887	1.4824
423.15	1.1423	619.23	24.467	227.18	599.75	0.60086	1.4813
433.15	1.3838	601.79	30.139	254.1	608.07	0.66283	1.4800
443.15	1.6621	583.1	37.048	281.79	615.48	0.72495	1.4779
453.15	1.9809	562.85	45.549	310.37	621.71	0.78747	1.4745
463.15	2.3446	540.58	56.174	340.02	626.38	0.85075	14.691